

*Т. В. Лоскутова, доцент, канд. техн. наук,  
І. Я. Смокович, аспірант,  
В. Г. Хижняк, д-р техн. наук, проф.,  
Р. Р. Тарасенко, студент.*

## **ЗАХИСНІ ПОКРИТТЯ ЗА УЧАСТЮ ХРОМУ ТА АЛЮМІНІЮ НА ТИТАНОВИХ СПЛАВАХ**

Національний технічний Університет «КПІ», [Ira.Smokovich@gmail.com](mailto:Ira.Smokovich@gmail.com)

*Показана можливість формування захисних покриттів на титановому сплаві ВТ1-0 та ВТ6. Досліджена структура гетерогенного комплексного покриття. Визначена мікротвердість фаз, що складають покриття, а також їх зносостійкість при абразивному зношуванні.*

**Вступ.** Титан та його сплави характеризуються сукупністю високих механічних властивостей і широко застосовуються при виготовленні деталей, які працюють за умов середніх та високих зусиль і швидкостей, при ударних навантаженнях, а також при терті і дії агресивних середовищ. Набуті на сьогодні знання в області фізико – механічних, експлуатаційних властивостей, зносостійкості сплавів титану спрямовані, в першу чергу, на розробку нових технологічних систем, схем та методів підвищення опору руйнуванню за умов контактної взаємодії при зростаючих швидкостях та навантаженнях. Перспективи створення оптимальних умов тертя пов'язані як зі знаннями напружено – деформованого стану в зоні контакту поверхонь тертя, так із відомостями щодо фізико – хімічних процесів і фазових перетворень в вихідних структурах.

**Суть проблеми.** Перспективність використання захисних покриттів для підвищення експлуатаційних властивостей деталей із сплавів титану, які працюють в умовах зношування відома [1 – 4]. Експлуатаційна надійність виробів з покриттями визначається цілим рядом факторів: твердістю, структурою, дефектністю будови, особливостями контактної взаємодії.

В залежності від функціонального призначення та умов експлуатації, захисні покриття сприймають тертя по-різному [5 – 8]. Тому з точки зору виконання покриттями своїх функціональних

задач матеріали покриття і основи повинні мати широкий спектр властивостей і досить часто протилежних.

Відомо [5; 6], що види поглинання контактною поверхнею енергії в процесі тертя та зношування в залежності від виду зношування можна розділити на три групи:

1) енергія передається через контактні поверхні з контртілом; при цьому взаємодія відбувається безпосередньо на локальних плямах контакту, які весь час змінюють конфігурацію та властивості;

2) поверхні, на які передають енергію є умовно суцільними середовищами; сили тертя формуються як інтегральний результат елементарних актів взаємодії поверхні з середовищем; вважають, що сила і робота елементарного акту взаємодії незначні, то припустимо, що інтегральні сила, робота, потік енергії сприймаються поверхнею рівномірно;

3) поверхні, які одночасно працюють в умовах роботи поверхонь першого і другого класів.

До першої групи відносяться поверхні, які працюють в парях тертя: підшипники ковзання, напрямні верстатів і механізмів та інші аналогічні випадки [6].

При ковзанні твердого виступу по деформівній поверхні перед виступом виникають зони стиснення, а за ним – розтягування. Таким чином виникає знакозмінний цикл навантаження матеріалу.

Аналіз різних схем та умов тертя та зношування показав, що найбільш придатним для поверхонь першої групи є гетерогенні матеріали. Структура таких матеріалів відповідає принципу Шарпі.

Прикладом триботехнічних систем другої групи є поверхні, які піддаються абразивному, гідроабразивному, кавітаційному та іншим видам зношування. Це робочі органи гідронасосів, ґрунтообробної та дорожньої техніки та ін. У цьому випадку поверхня піддається руйнуванню за рахунок величезної кількості ударів, мікрорізанню абразивними частками, перепадів тиску середовища.

Дискретність таких елементарних актів сумірна із структурними складовими матеріалів. Тобто, їх дії піддаються як і найбільш міцні та зносостійкі, так і найбільш слабкі компоненти структури (границі зерен, пори, тріщини, на пізніх стадіях руйнування – матеріал основи). Очевидно, що гетерогенна структура менш придатна для роботи в таких умовах, ніж структура на основі однієї фази (гомогенна).

Як вже відзначили, особливий інтерес має проблема підвищення ресурсу виробів із титану і його сплавів, які працюють в умовах абразивного зношування, а в деяких випадках і дії агресивних середовищ.

Відомо [1; 5; 6], що для розробки нових зносостійких матеріалів, покриттів та формулювання практичних рекомендацій щодо їх використання необхідно мати результати випробувань.

**Методика та суть експерименту.** Комплексні хромоалітовані покриття наносили на сплав ВТ6 порошковим методом в середовищі хлору. Вироби завантажували в контейнер разом з насичуючою сумішшю, яка складалася з 5 % мас. алюмінію, 45 % мас. хрому, 47 % мас. інертної речовини  $Al_2O_3$  і 3,0 % мас. активатору, в якості якого використовували  $NH_4Cl$ . Після цього контейнер герметизували, нагрівали до температури 1323 К та витримували протягом 2 годин.

Дифузійне хромування технічно чистого титану ВТ1-0 проводили при температурі 1050° С впродовж 4 годин. В якості суміші для хромування використовували порошок хрому – 50 % за масою, активатор  $NiCl_2$  – 5 % та інертну домішку  $Al_2O_3$  – 45 %. За прийнятних умов насичення на поверхні титану утворюється покриття, що складається з кількох зон, які відрізняються за фазовим та хімічним складом.

Зносостійкість в умовах абразивного зношування визначали по методиці і на спеціальній установці, яка розроблена на кафедрі металознавства та термічної обробки Національного технічного університету України «КПІ». Суть застосованої методики визначення зносостійкості полягає в тому, що циліндричні зразки титану без покриттів та після різних видів обробки поверхні здійснювали обертання навколо своєї осі і по колу в середовищі з абразивом. В якості абразиву використовували карбід бору з величиною часточок 150 мкм та мікротвердістю приблизно 42 ГПа. Випробовували одночасно два зразки з досліджуваними захисними покриттями і без покриттів. Зносостійкість покриттів оцінювали за втратою маси, яку вимірювали на аналітичних терезах з точністю до четвертого знаку після коми. За втратою маси знаходили показник зносостійкості за формулою:

$$K_m = \Delta m / S_{\tau}$$

де  $\Delta m$  – втрата маси, кг;  $S$  – площа поверхні зразка,  $m^2$ ;  $\tau$  – тривалість випробувань,  $\tau = 2 \dots 10$ .

**Результати експерименту.** Встановлено, що отримані за даною технологією хромоалітовані покриття складаються з шарів, які ідуть паралельно фронту дифузії. Відповідно до результатів мікрорентгеноспектрального аналізу та результатів вимірювання мікротвердості даний шар представляє собою зону сполук за участю насичуючих елементів та елементів основи (рис. 1).

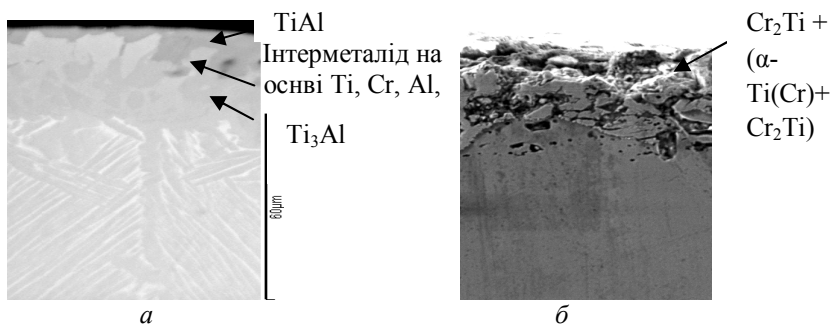


Рис. 1. Мікроструктура комплексного хромоалітованого покриття, отриманого на титановому сплаві VT6 (а), та хромованого покриття на сплаві VT1-0 (б)

На зовнішній стороні хромоалітованого дифузійного шару розташована зона, що складається з зерен темно – сірого кольору. Зерна мають чітку огранку. Розміри зерен змінюються по товщині від 5,0 до 14,5 мкм. При цьому, окремі зерна не утворюють суцільного шару. Можна вважати, що встановлена зона близька за складом до сполуки TiAl, в якій розчиняється певна кількість хрому та ванадію. В центральній частині зони сполук розташований шар світло – сірого кольору, який був ідентифікований нами як складний інтерметалід за участю титану, алюмінію, хрому та ванадію. Вміст хрому в ньому досягає 15,81–13,58 %мас. Безпосередньо до основи примикає суцільний шар на основі фази Ti<sub>3</sub>Al, легованої ванадієм та хромом. Загальна товщина зони сполук становить 28–30 мкм. Зона твердого розчину алюмінію та хрому, яка розташована безпосередньо під зоною сполук, не відрізняється структурно від зони основного сплаву. Мікротвердість зони сполук виявилась достатньо високою і становить на зовнішній стороні покриття 5,0–8,1 ГПа, в

центральної зоні – 7,1–9,5 ГПа, внутрішніх зоні – 8,0–11,0 ГПа. Значна мікротвердість сполук покриття зумовлена, з нашої точки зору, можливою присутністю дисперсних включень оксидів, нітридів та карбідів елементів, що входять до складу покриття. Джерелом вуглецю, кисню та азоту відповідно до результатів фізико-хімічних досліджень процесу насичення можуть бути сполуки вихідної суміші:  $Al_2O_3$ ,  $NH_4Cl$ ,  $CCl_4$ .

В свою чергу на поверхні хромованого сплаву ВТ1-0 розташована гетерогенна зона товщиною 15–20 мкм. Виходячи з даних рентгеноструктурного та мікрорентгеноспектрального аналізів визначено (таблиця), що цей шар складається з суміші зерен  $Cr_2Ti$  та зерен евтектоїду ( $\alpha-Ti(Cr)+Cr_2Ti$ ) з вмістом хрому (0,2–0,3) % за масою. Під гетерогенною зоною розташований шар  $\alpha-Ti(Cr)$ , товщиною 100–120 мкм, в якому спостерігаються дисперсні включення  $Cr_2Ti$ .

Таблиця

**Фазовий, хімічний склад та мікротвердість покриттів, отриманих комплексним хромоалітуванням титанового сплаву ВТ6 та хромуванням сплаву ВТ1-0**

Сплав	Вид покриття	Фаза	Вміст елементів, %мас				Мікротвердість ГПа
			Al	Cr	Ti	V	
ВТ6	Хромоалітуване	$TiAl$	27,8–27,9	5,4–4,3	64,3–65,6	2,4–2,2	5,0–8,0
		інтерметалід за участю (Ti, V, Cr, Al)	19,9–20,3	15,8–13,6	57,8–60,5	6,4–5,6	7,0–9,0
		$Ti_3Al$	21,4–20,3	4,9–5,3	69,5–68,9	4,2–5,5	8,0–11,0
ВТ1-0	Хромуване	$Cr_2Ti + (\alpha-Ti(Cr)+Cr_2Ti)$	–	10–3,0	97,0–90,0	–	5,5–9,0
		$\alpha-Ti(Cr)$ та включення $Cr_2Ti$	–	3,0–2,5	97,5–97	–	5,0–7,0

Кількість цих включень максимальна на глибині (22–25) мкм – біля 5 % за об'ємом, і зменшується по мірі віддалення від межі з гетерогенним шаром. На глибині 100 мкм включення  $Cr_2Ti$  майже

відсутні, а вміст хрому наближується до його вмісту в твердому розчині. В деяких місцях, найчастіше на стиках границь зерен, зустрічаються зерна, що за структурою та хімічних складом відповідають евтектоїду. Утворення таких зерен пояснюється прискореною граничною дифузією хрому в титані. Хромовані покриття, отримані на титані в засипці з порошку хрому з  $\text{NiCl}_2$  в якості активатора, характеризуються відносно невисокою мікротвердістю. Часто вони мають тріщини, які з'являються в процесі нанесення чи охолодження. Імовірно, це пов'язано з перерозподілом в покритті домішок втілення та виникаючими при цьому напруженнями.

Зносостійкість отриманих покриттів в умовах абразивного зносу досліджували за допомогою установки, що складалась з електродвигуна, редуктора, станини з нерухомою шестернею, обертового диску, вал-шестерень, підшипників ковзання і ємності з абразивом. Диск, в радіально розташованих підшипниках ковзання якого вільно обертаються чотири вал-шестерні з закріпленими на них зразками, з'єднаний безпосередньо з вихідним валом редуктора. При вмиканні електродвигуна диск починає обертатись з вал-шестернями і зразками зі швидкістю 2 об/с. Вал-шестерні, знаходячись в зачепленні з нерухомою шестернею, одночасно обертаються навколо своєї осі з тією ж швидкістю, що і диск.

Аналіз результатів дослідження абразивної зносостійкості комплексних покриттів за участі хрому та алюмінію показав (рис. 2), що зносостійкість сплаву в результаті нанесення захисних покриттів підвищилася в порівнянні з вихідним сплавом ВТ6 в 2,3 – 3,66 разів.

Має інтерес проаналізувати причини відмінності показників зносостійкості отриманих покриттів. В даній роботі показано, що в результаті комплексного насичення хромом та алюмінієм сплаву ВТ6 формуються покриття, які суттєво відрізняються за фазовим складом та, в меншій мірі, мікротвердістю від покриттів на основі хрому. У відповідності до отриманих результатів мікротвердість зони  $\text{Ti}_3\text{Al}$  хромоалітованих шарів складає 8,0 – 11,0 ГПа. Аналіз мікроструктур покриттів показав, що пористість хромоалітованих шарів нижча за пористість хромованих.

Останнє може бути зумовлене присутністю алюмінію в шарі. Алюміній в реакційному просторі у вигляді хлоридів з парціальним тиском вищим за парціальний тиск хлоридів титану та хрому попереджує відвід титану основи в газову фазу і таким чином запобігає утворенню пор в покритті.

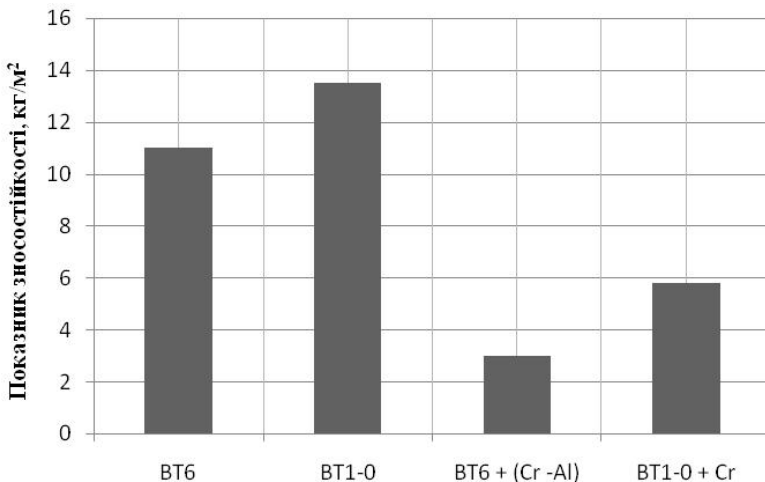


Рис. 2. Гістограма показників зносостійкості сплаву BT6 та сплаву BT1-0 у вихідному стані та після хромоалітування та хромування відповідно, час випробувань 10 годин

Таким чином, отримані дані дозволяють зробити висновок, що зносостійкість покриттів визначається їх мікротвердістю і структурними характеристиками.

В роботі показано, що явище зносу при взаємодії з абразивом відбувається лише в тонких поверхневих шарах шляхом видалення часток покриття. Слід зазначити, що в процесі випробування шорсткість поверхні зразка встановлюється в перші 10 – 15 хвилин і далі не змінюється. Можна вважати, що руйнування насиченої поверхні при абразивному зношуванні протікає в дві стадії, на кожній з яких опір руйнуванню і деформації визначається принципово різними властивостями [12; 13]:

- на першій стадії частка абразиву проникає в покриття; цей процес відповідає проникненню алмазного індентора при вимірюванні твердості; опір проникненню абразиву в покриття буде визначатися мікротвердістю поверхневих зон;

- на другій стадії зношування має місце процес переміщення абразиву, який проник в поверхню, з руйнуванням окремих ділянок покриття; опір процесу руйнування буде визначатися для твердих матеріалів їх тріщиностійкістю.

Наведені вище результати випробувань дають можливість рекомендувати даний тип покриттів для підвищення ресурсу виробів із сплавів титану в умовах абразивного зношування.

**Висновки.** Показана можливість отримання на поверхні титанового сплаву ВТ6 комплексного покриття за участю сполук титану, алюмінію, хрому та ванадію, мікротвердість яких становить 5,0–11,5 ГПа. Максимальний вміст алюмінію (27,89...27,9 % мас.) було виявлено на зовнішній стороні покриття, максимальний вміст хрому (15,81–13,58 % мас.) на внутрішній зоні покриття. Аналіз результатів дослідження абразивної зносостійкості покриттів показав, що зносостійкість сплаву в результаті нанесення захисних покриттів підвищилася в порівнянні з вихідними показниками зносостійкості для сплавів ВТ6 та ВТ1-0 в 1,6 – 3,2 рази.

Можна вважати, що отримані в роботі покриття перспективні і будуть сприяти підвищенню абразивної- та зносостійкості титанового сплаву ВТ6 та ВТ1-0.

### Список літератури

1. Лоскутов В. Ф. Диффузионные карбидные покрытия / В. Ф. Лоскутов, В. Г. Хижняк, Ю. А. Куницкий и др. - Киев: Техніка, 1991. – 168 с.
2. Самсонов Г. В. Тугоплавкие покрытия / Г. В. Самсонов, А. П. Эпик. – М.: Металлургия, 1973. – 400 с.
3. Минкевич А. Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов / А. Н. Минкевич. – М.: Машиностроение, 1965. – 331 с.
4. Земсков Г. В. Многокомпонентное диффузионное насыщение металлов и сплавов / Г. В. Земсков, Р. Л. Коган. – М.: Металлургия, 1978. – 208 с.
5. Костецкий Б. И. Трение, смазка и износ в машинах / Б. И. Костецкий. – К.: Техніка, 1970. – 278 с.
6. Крагельский И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. – М.: Машгиз., 1962. – 230 с.
7. Хижняк В. Г. Износостойкость карбидных и боридных покрытий на стали У8А / В. Г. Хижняк, А. Д. Костенко, В. И. Король // Порошковая металлургия. – 2003. - № 11 – 12. – С. 110 – 115.
8. Хижняк В. Г. Особливості будови та характеристики міцності карбідних покриттів на сталях / В. Г. Хижняк, В. І. Король // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2003. - №1. – С. 62 – 68.
9. Бельский Е. И. О механизме износа материалов кузнечных штампов / Е. И. Бельский, В. М. Пикуло. – Минск: Наука и техника, 1974. – 160 с.



10. *Тененбаум М. М.* Сопротивление абразивному изнашиванию / М. М. Тененбаум – М.: Машиностроение, 1976. – 271 с.

11. *Прейс Г. А.* Повышение износостойкости оборудования пищевой промышленности / Г. А. Прейс, Н. А. Сологуб, А. И. Неказ. – М.: Машиностроение, 1979. – 208 с.

12. *Похмурский В. И.* Повышение долговечности деталей пашин с помощью диффузионных покрытий / В. И. Похмурский, В. Б. Далисов, В. М. Голубец – К.: Наукова думка, 1980. – 188 с.

13. *Хижняк В. Г.* Термодинамічні умови одержання двокомпонентних покриттів в газовій фазі за участю хлору при зниженому тиску / В. Г. Хижняк // *Металознавство та обробка металів.* – 1997. – № 2. – С. 38–40.

*Лоскутова Т. В., Смокович І. Я., Хижняк В. Г., Тарасенко Р. Р.* **Защитные покрытия при участии хрома и алюминия на титане и титановых сплавах** // *Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб.* – К.: НАУ, 2012. – Вип. 58. – С.152–160.

Показана возможность формирования защитных покрытий на титановых сплавах ВТ1-0 и ВТ6. Исследовано строение гетерогенного комплексного покрытия. Определена микротвердость фаз, составляющих покрытие, а также их свойства износостойкости при абразивном износе.

Рис. 2, табл. 1, список лит.: 13 наим.

*Loskutova T. V., Smokovych I. J., Khyzhnyak. V. G., Tarasenko R. R.* **Protective Coating with the participation of chromium and aluminum on titanium and titanium alloys.**

It is presented the possibility of the formation of protective coatings on titanium alloys ВТ6 and ВТ1-0. The structure of the integrated coating layer is investigated. Microhardness of phases that make up the coating is defined, as well as the properties of wear resistance in abrasive wear.

**Ключові слова:** Титанові сплави, ВТ6, ВТ1-0, зносостійкість, абразивне зношування, дифузійні покриття, хромування, хромоалітування

Стаття надійшла до редакції 22.10.2012